

令和 4 年 9 月 14 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03590

研究課題名(和文)「強磁場側斜め直接入射法」による遮断密度以上での電子サイクロトロン共鳴加熱の研究

研究課題名(英文) Study of electron cyclotron resonance heating in over-dense plasmas with direct oblique launching from the high field side

研究代表者

伊神 弘恵 (Hiroe, Igami)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：10390634

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：基本電子サイクロトロン共鳴周波数を用いた磁場閉じ込めプラズマの電子サイクロトロン共鳴加熱(ECRH)のためには、通常正常波が弱磁場側から入射される。本研究では大型ヘリカル装置(LHD)において基本異常波を電子サイクロトロン共鳴層よりも強磁場側から入射することで弱磁場の低密度領域に現れる異常波の遮断を避け、プラズマの点火から正常波の遮断密度を超える密度の領域までのECRHが可能であることを実験的に実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁場閉じ込め形式の核融合装置における炉心プラズマにおいて、電子サイクロトロン波による共鳴加熱(ECRH)は、炉心プラズマの生成・保持・電流駆動に大きな役割を果たすと期待される。通常ECRHには基本あるいは第二高調サイクロトロン共鳴周波数が用いられ、第二高調波の方が高密度領域まで伝播可能であるが、磁場強度の大きい核融合プラズマでは第二高調波帯の大電力/定常発振管の開発が困難となる可能性がある。本研究により、基本波の正常波遮断密度を超えるプラズマのECRHが可能ことが実験的に実証され、核融合炉心プラズマの加熱可能密度領域の拡張が可能であることが示された。

研究成果の概要(英文)：For electron cyclotron resonance heating (ECRH) with the fundamental electron cyclotron wave, the ordinary (0-) mode is usually launched from the lower magnetic field side in magnetically confined plasmas. In this study, the extraordinary (X-) mode was launched from the high magnetic field side not to encounter the X-mode cutoff that appears in the low density region in the low magnetic side. And we experimentally demonstrated the plasma initiation and ECRH in the region where the plasma electron density exceeds the 0-mode cutoff by high field launching of the fundamental X-mode.

研究分野：プラズマ工学

キーワード：電子サイクロトロン共鳴加熱 高密度プラズマ加熱 プラズマ波動相互作用

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め型核融合炉における高密度運転シナリオの実現には、中性子/熱負荷の小さい場所に設置されたアンテナを用いて、電子サイクロトロン共鳴加熱(ECRH)を高密度領域まで行う手法を確立することが求められる。ECRHには基本正常波及び第二高調異常波が用いられ、後者の方が高密度領域まで伝播できるが、核融合炉での第二高調波帯周波数は300GHzを超えるため、大電力定常発振管の開発が困難となる可能性がある。このため基本波によるECRHの適用密度領域を拡張することは重要である。

磁場に対して斜めの伝播成分を持つ異常波モードの基本波は強い電子サイクロトロン共鳴吸収を受けるが、弱磁場側に入射アンテナがある場合右手遮断に遭遇するために反射されて電子サイクロトロン共鳴(ECR)層まで伝播できない。しかし強磁場側から入射することができれば、右手遮断には遭遇しない。この場合、伝播密度限界は基本正常波の遮断密度の二倍である左手遮断密度となるので、弱磁場側から入射される第二高調異常波の右手遮断密度と同じとなる。また、ECR層で磁場に対しほぼ垂直伝播となる場合は、基本異常波のサイクロトロン共鳴吸収は弱くなり、ECR層を通過して高域混成共鳴(UHR)層に近接し静電波である電子バーンシュタイン波(EBW)にモード変換する。EBWは伝播密度限界がなくECR層でサイクロトロン共鳴吸収されるため、EBWへのモード変換が起こる入射条件を設定できれば、より高密度でのECRHが可能となる。

トーラス型の磁場閉じ込め装置において、強磁場側に電磁波の入射アンテナを設置することは空間的な制限が大きい。COMPASS-D トカマク装置での実験[1]のように上部あるいは下部ポートのトーラス中心近くにアンテナを設置することができれば強磁場側入射は不可能ではない。また、ヘリオトロン型磁場配位を持つ大型ヘリカル装置(LHD)では、トーラス外側の水平ポートから斜め右上方に電磁波入射を行うことで強磁場側入射が可能となる。強磁場側からの異常波入射により、基本正常波の遮断密度を超える高密度プラズマのECRHが可能であることが実験的に実証されれば、核融合炉においてアンテナ設置条件の工夫により、基本波ECRHの適用による高密度運転シナリオの実現可能性が高まることが期待される。

2. 研究の目的

ヘリオトロン型磁場配位で可能となる独自の入射手法で入射条件を大きく変えることなく、プラズマ点火から基本正常波の遮断密度以上に至るまでの幅広い密度領域で基本異常波によるECRHが可能であることを世界で初めて実験的に実証する。

過去のLHDにおける低密度プラズマでの強磁場側基本異常波入射実験の結果からは、強磁場側から入射された異常波は閉じた磁気面の外側のプラズマ周辺領域において大きな屈折を受けながら主閉じ込め領域に侵入することが示唆されている[2]。プラズマ周辺領域における波動伝播を正確に評価する数値的解析手法を開発し、主閉じ込め領域に効率よく異常波が侵入する電磁波入射条件を詳細に数値検討できるようにする。

3. 研究の方法

LHDにおいて、トーラス外側の水平ポートに設置されたECRH用アンテナを用いて77GHzの基本異常波の強磁場側入射実験を行う。プラズマ点火を狙った入射と、あらかじめ生成・保持された高密度ターゲットプラズマへの入射を行い、放電ごとに入射方向を変えて、高密度プラズマでの効果的な加熱条件を探索する。

図1に示すように入射された波はプラズマを閉じ込める真空容器壁の近傍を通過して、周辺部プラズマ領域で屈折されながら主閉じ込め領域へと侵入すると予想される。真空容器壁と基本電子サイクロトロン共鳴(ECR)層の間の狭い空間に入射電磁波ビームを通すためには入射方向の正確性を上げる必要がある。真空容器保護用のモリブデン製タイルの中に熱電対を埋め込んだ、ビームアライメント用ターゲットタイルを設置し、真空引き後もターゲットタイルにむけた電磁波入射を行うことで、入射アンテナの照準方向確認ができるようにする。また、入射条件設定が適切でない場合にECR層で吸収されずに真空容器内に残留した漏洩波を検出するマイクロ波ポロメータを用いて、漏洩波による真空容器内構造物の破損が起きないように注意し

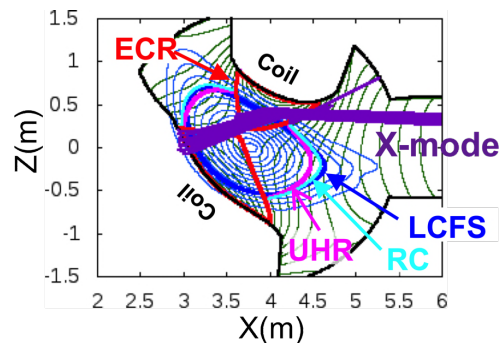


図1:LHDにおける強磁場側基本異常波(X-mode)入射の概念図。基本 ECR 層(赤)の強磁場側から最外殻磁気面(LCFS 青)を超えて右手サイクロトロン遮断(RC 水色)に遭遇することなくプラズマ内部へと侵入する。

ながら基本異常波入射実験が実施できるようにする。

閉じた磁気面より外のプラズマ周辺領域の密度と温度を、トムソン散乱計測データと、平衡磁場の磁気面データの外挿データを用いて与え、光線追跡法による波動伝播計算を行う。基本異常波の吸収は、熱プラズマの分散式から屈折率の虚数成分を計算することで評価する。また、密度揺動による散乱、磁気シアの存在に起因する低密度領域での電磁波間モード結合、光線追跡計算の精度が落ちる高域混成共鳴近傍の波動伝播特性、を評価するために波動光学的計算ルーチンを整備する。

4. 研究成果

先行して開発していたマイクロ波ボロメータの性能を評価し[3]、入射電磁波がプラズマに侵入する位置の近くのポートに増設した。また図2に示すビームアライメント用ターゲットタイルを開発し、LHDの真空引き後のターゲットタイルに向けた電磁波入射実験を行い性能を評価した[4]。

プラズマ周辺部の光線追跡計算と熱プラズマの分散関係を用いた基本異常波の吸収計算を行う数値解析コードを整備し、プラズマ周辺部から主閉じ込め領域にわたる波動伝播の幾何光学的解析により、基本異常波加熱実験結果の解析を行なった[5]。プラズマ周辺部での屈折効果と磁場に対して斜めに伝播する基本異常波の吸収効率を分散式を用いて直接求めた計算により、実験的に示されるパワー吸収領域と数値的に予測される吸収領域が良く一致することを示した。

LHDにおいて強磁場側からの基本異常波入射実験を行なった。規格化小半径で0.8の位置にECR層がある磁場配位において、他の加熱入力なしに0.3秒間/0.15 MWの基本異常波を強磁場側入射することで、線平均電子密度 $0.3 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ のプラズマを立ち上げることができた[6]。また、図3に示す様に、入射された77GHz電磁波の正常波の遮断密度 ($7.35 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$) を超える線平均密度 ($\sim 10 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$) のプラズマを中性粒子ビーム入射で維持し、基本異常波の強磁場側入射を行うことで、蓄積エネルギーと電子サイクロトロン放射(ECE)で計測された電子温度の増加が観測され、有効な加熱が起きていることが確認された。

基本異常波の強磁場側入射の加熱効率は、遮断密度の約70%までは80%以上の効率が入射方向の最適化で得られるが、密度が正常波の遮断密度に近づくと50%程度に低下する。プラズマ周辺部における入射ビームの広がりや電磁波間磁気シアに起因するモード混合の影響が考えられる。これらの影響を詳細に評価するために、TASK-WF2Dコードを用いた波動光学的解析を任意の磁場・密度・温度分布を持つ二次元プラズマで適用できるように、数値計算コードの整備と計算用WSの導入を行なった[7]。プラズマ境界近傍の低密度領域では、一様磁場であっても計算メッシュの細かさが十分でないと電磁波間モード間結合が起きてしまいプラズマ中を伝播するモードを正確に評価できない。WSの計算用メモリを増設し、計算メッシュサイズを真空中波長の1/40以下とすることで、計算メッシュサイズに起因する電磁波間モード間結合の影響を無視できる程度にし、プラズマ境界部の伝播モードを正しく記述できるようになった。また、この数値計算コードを用いて正常波-異常波-電子パーンシュタイン波(O-X-B)変換過程を経た高密度プラズマにおける有限幅波動のO-X変換過程特性を正確に評価できるようになった(図4)。

本研究の遂行により、プラズマの最外殻磁気面近傍の低温度領域でも基本異常波の強磁場側

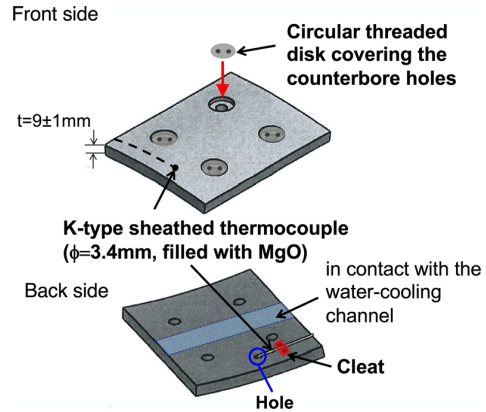


図2:新たに開発した、真空引き後のビームアライメント用ミリ波ターゲットタイル[4]

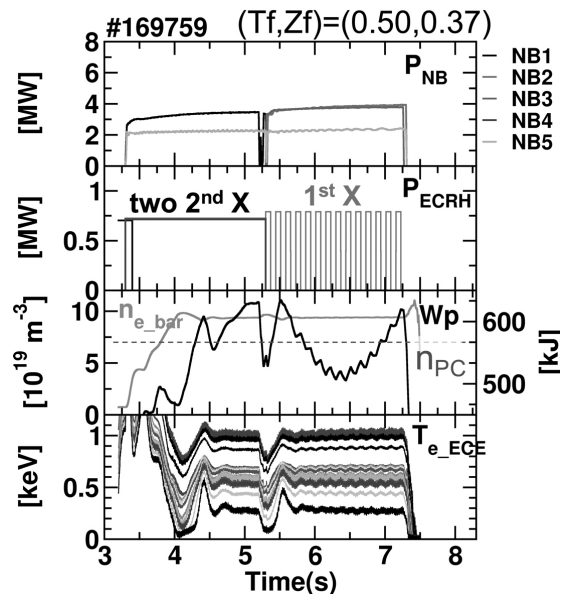


図3: 正常波の遮断密度(n_{PC})を超える線平均密度のプラズマへの基本異常波入射時の放電波形。上から、中性ビーム入射パワー、ECRH入射パワー、蓄積エネルギー(W_p)と線平均電子密度、ECE計測で得られた電子温度(T_{e_ECE})の時間変化波形。基本異常波(1st X)の変調入射時に、 W_p と T_{e_ECE} に変調が観測される

入射による効果的な局所加熱が可能となった。基本異常波入射によるプラズマ周辺部の局所加熱をした場合の熱パルス伝播特性を調べたところ、プラズマコア部への非熱伝導的な熱伝播の存在を示唆する、プラズマの熱輸送特性研究に新たな知見を与える実験結果が得られている。

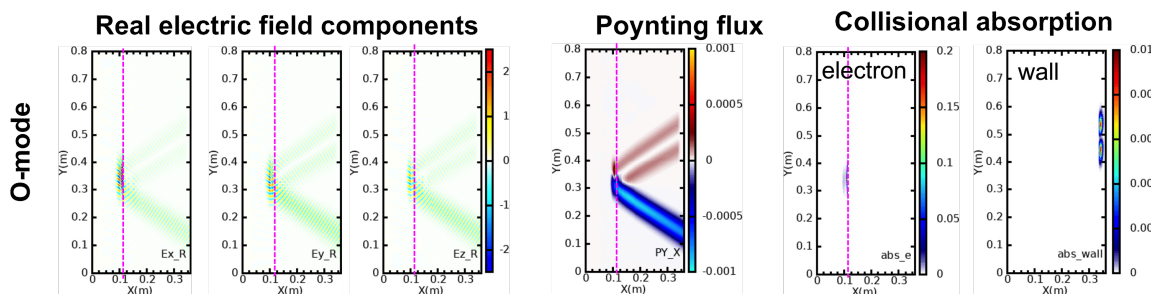


図 4: TASK WF-2D コードで計算した(左から) 電場の X 成分、Y 成分、Z 成分の実数成分、電場から計算した X 方向のポインティング束、電子への衝突吸収パワー、計算領域外縁に設置した吸収壁に吸収されたパワー。プラズマ遮断のある高密度プラズマに、最も高い正常波・異常波(O-X)変換効率が見られると平面波理論から予測される方向に正常波を入射した。ポインティング束、あるいは衝突パワーを解析することで、有限幅波動の O-X 変換効率を定量的に評価できる。

参考文献・研究発表

- [1] V. Shevchenko, et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 265005 (2002)
- [2] H. Igami et al., Nucl. Fusion **49** 115005 (2009)
- [3] H. Igami et al., Proceedings of 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (2018) (by IEEE eXprole)
- [4] H. Igami et al., Plasma and Fusion Research **16** 2405066 (2021)
- [5] H. Igami et al., EPJ Web of Conferences **203** 02001 (2019)
- [6] 伊神弘恵、他 第 36 回プラズマ・核融合学会年会 “LHD における基本 ECR 層強磁場側からの異常波斜め直接入射による加熱” ポスター発表 02P59
- [7] H. Igami et al., “Estimation of the O-X-B and X-X-B mode conversion rates with taking into account the electric field profile of the launched wave by using full wave analysis” DPP19 meeting of APS ポスター発表 UP10.00067 (2019)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hiroe IGAMI, Ryoma YANAI, Satoshi ITO, Yasuo YOSHIMURA, Shin KUBO, Hiromi TAKAHASHI, Takashi SHIMOZUMA, Toru Ii TSUJIMURA, Masaki NISHIURA and Yoshinori MIZUNO	4. 巻 16
2. 論文標題 Development of the Molybdenum Millimeter Wave Target Tile for ECRH Antenna Alignment after the Evacuation in LHD	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 245066, 245066
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.16.2405066	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Igami Hiroe, Kubo Shin, Shimozuma Takashi, Yoshimura Yasuo, Ii Tsujimura Toru, et al.	4. 巻 203
2. 論文標題 Recent ECRH/ECCD experiments aiming for higher density and temperature operations in the LHD	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 02001 ~ 02001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201920302001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Igami Hiroe, Kubo Shin, Shimozuma Takashi, Yoshimura Yasuo, Takahashi Hiromi, Tsujimura Toru Ii	4. 巻 CFP181MM-POD
2. 論文標題 Development of a Quick-Response Microwave Bolometer for the Stray Radiation Measurement in LHD	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2018)	6. 最初と最後の頁 1224-1225
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IRMMW-THz.2018.8510348	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 1件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 伊神弘恵、長崎百伸、加藤悠、福山淳、下妻隆、吉村泰夫、西浦正樹、高橋裕己、辻村享、鈿持尚輝、矢内亮馬
2. 発表標題 LHD低磁場放電における電子バーンシュタイン波放射計測
3. 学会等名 第38回プラズマ・核融合学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Igami, K. Nagasaki, Y. Kato, A. Fukuyama, T. Shimozuma, Y. Yoshimura, M. Nishiura, H. Takahashi, T. Tsujimura, N. Kenmochi, and R. Yanai
2. 発表標題 Electron Bernstein wave Emission Measurement in Ka-band for high b discharges in LHD
3. 学会等名 The 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊神弘恵, 長崎百伸, 加藤悠, 福山淳, 下妻隆, 吉村泰夫, 西浦正樹, 高橋裕己, 辻村享, 釘持尚輝, 矢内亮馬
2. 発表標題 LHD低磁場放電における電子パーンシュタイン波放射計測
3. 学会等名 第38回 プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Igami, A. Fukuyama, K. Nagasaki
2. 発表標題 Evaluation of the O-X mode conversion rate of the finite width wave in two dimensional systems
3. 学会等名 21st Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission (ECE) and Electron Cyclotron Resonance Heating (ECRH) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroe Igami
2. 発表標題 Development of the Molybdenum Millimeter Wave Target Tile for ECRH Antenna Alignment after the Evacuation in LHD
3. 学会等名 The 29th International Toki Conference (ITC29) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊神弘恵、久保伸、下妻隆、吉村泰夫、西浦正樹、辻村亨、矢内亮馬、 劔持尚輝、田中謙治
2. 発表標題 強磁場側からの基本Xモード入射による高密度プラズマの電子サイクロトロン共鳴加熱
3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroe Igami
2. 発表標題 Excitation and propagation of waves in ion cyclotron harmonics and lower hybrid wave frequency range originated from high energy and low pitch angle ions in a magnetically confined fusion oriented device
3. 学会等名 9th East Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical Plasmas (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊神弘恵
2. 発表標題 LHDにおける基本ECR層強磁場側からの異常波斜め直接入射による加熱
3. 学会等名 第36回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Igami Hiroe, Kubo Shin, Shimosuma Takashi, Yoshimura Yasuo, Takahashi Hiromi, Ii Tsujimura Toru et al.
2. 発表標題 Recent progress of the applications of ECRH/ECCD and the supportive technologies in the LHD
3. 学会等名 20th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission (ECE) and Electron Cyclotron Resonance Heating (ECRH) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Igami Hiroe、Kubo Shin、Shimozuma Takashi、Yoshimura Yasuo、Takahashi Hiromi、Tsujimura Toru Ii
2. 発表標題 Development of a Quick-Response Microwave Bolometer for the Stray Radiation Measurement in LHD
3. 学会等名 2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroe Igami, Mieko Toida, Kenji Saito, Tsuyoshi Akiyama, Ryosuke Seki, Shuji Kamio and LHD experiment group
2. 発表標題 Observation of stair-like frequency transitions of ion cyclotron harmonic emissions in the lower hybrid frequency range in LHD
3. 学会等名 The 27th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research & the 13th Asia Pacific Plasma Theory Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊神弘恵、樋田美栄子、齋藤健二、秋山毅志、神尾修治、關良輔
2. 発表標題 中性粒子入射と電子サイクロトロン共鳴加熱による プラズマ立ち上げ時の低域混成共鳴周波数帯の波動計測
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第35回年会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	福山 淳 (Fukuyama Atsushi)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	辻村 亨 (Tsujimura Toru) (00732744)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教 (63902)	
研究協力者	吉村 泰夫 (Yoshimura Yasuo) (90300730)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授 (63902)	
研究協力者	久保 伸 (Kubo Shin) (80170025)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授 (63902)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関